

УДК 524.31.08

НЕОДНОРОДНОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ HDE 226868 (Cyg X-1) И α Cam

Е.А. Карицкая, Н.Г. Бочкарев, В.В. Шиманский, Г.А. Галазутдинов

Аннотация

Методом моделирования синтетического спектра с учетом не-ЛТР-эффектов определены химические составы атмосфер О-сверхгигантов HDE 226868 (оптический компонент Cyg X-1) и α Cam, имеющих близкие физические характеристики, но расположенных на расстоянии 2.5–2.7 кпк друг от друга. Среднее содержание элементов группы CNO, а также Al, S и Zn в HDE 226868 на 0.15–0.30 dex превосходит содержание этих элементов в α Cam. Установленное различие содержаний находится в качественном соответствии с распределением тяжелых элементов в диске Галактики, полученным в работе Лака и др. в результате исследования 50 галактических цефеид. Данный факт является подтверждением неоднородности распределения тяжелых элементов на масштабе порядка 2 кпк и соответствует представлениям о сохранении индивидуальных характеристик «сверхоблаков» в межзвездной среде на шкале времени более одного миллиарда лет.

Ключевые слова: содержание элементов, неоднородность межзвездной материи, сверхоблака, О-сверхгиганты, моделирование спектров, не-ЛТР-модели, звездные атмосферы.

Введение

В литературе, посвященной строению Галактики и межзвездной среде, с 80-х годов XX в. обсуждается (см., например, [1], ссылки в ней, [2]) вопрос о существовании сверхоблаков с характерным размером 1 кпк, которые сохраняют свою индивидуальность на протяжении 1–2 млрд. лет. За время жизни сверхоблака в нем образуется несколько поколений молодых горячих звезд. Это может приводить к различию химического состава сверхоблаков, то есть к неоднородностям содержаний тяжелых элементов в межзвездной среде диска Галактики с характерным масштабом около 2 кпк.

Около 15 лет назад Н.С. Комаров в беседе с одним из авторов (Н.Б.) отметил, что данные о химическом составе звезд возможно указывают на существование таких неоднородностей. Однако имевшихся в конце прошлого столетия данных было недостаточно для получения надежного результата. Лишь в последние годы были получены детальные данные о химическом составе 50 галактических цефеид [3]. Они позволили авторам [3] заявить о формировании в галактическом диске нерадиальной неоднородности распределения химических элементов. Ввиду важности проблемы мы решили использовать полученные нами результаты анализа химического состава двух О-сверхгигантов для независимой проверки этого предположения.

1. Определение содержания элементов

Целью наших исследований было определение содержания элементов в атмосфере оптического компонента известного рентгеновского источника Cyg X-1 –

Табл. 1

Параметры HDE 226868 (Cyg X-1) и HD 30614 (α Cam)

Звезда	HDE 226868	HD 30614
Спектр. класс	O9.7 Iab	O9.5 I
V , зв. вел.	8.9	4.3
l	74°	144°
d , кпк	2.5	2.1
T_{eff} , K	30400 ± 1000	30800 ± 1200
$\lg g$	3.31 ± 0.08	3.26 ± 0.10

сверхгиганта класса O9.7 Iab. Однако при определении химического состава горячих сверхгигантов большую роль играют не-ЛТР-процессы и неточности в применяемых моделях атмосфер и силах осцилляторов линий. Поэтому для контроля полученных результатов нами определены параметры атмосферы и содержание элементов сверхгиганта O9.5 I с близкими характеристиками – α Cam. Основные сведения об исследованных нами объектах приведены в табл. 1.

Спектры обоих объектов получены в ночь 30/31 октября 2004 г. на оптоволоконном эшелле-спектрографе 1.84-м телескопа обсерватории ВАО (Южная Корея) со спектральным разрешением $R = 30000$ в диапазоне $\lambda = 3800 \div 10000$ Å. Первичная редукция и анализ данных для обоих объектов выполнены по одинаковой методике.

На основе согласования профилей бальмеровских линий водорода H I и линий He I в наблюдаемых спектрах объектов с рассчитанными методом синтетического спектра с прямым учетом отклонений от ЛТР определены эффективные температуры T_{eff} и ускорения сил тяжести $\lg g$ (см. табл. 1). Методика моделирования и исследования спектров описана в работе [4]. Она базируется на использовании программного комплекса SPECTR [5]. Дифференциальным методом с применением одинакового набора 103 спектральных линий были определены содержания 10 элементов в атмосферах звезд (см. рис. 1). Малые различия параметров звезд и применение дифференциального анализа содержаний позволили исключить ошибки сил осцилляторов, неточности моделей атмосфер и недостатки методики расчетов синтетических спектров в комплексе SPECTR [5]. Поэтому полученным оценкам различия содержания химических элементов можно доверять.

Содержание гелия и всех исследованных тяжелых элементов в HDE 226868 оказалось выше, чем в α Cam. В атмосфере сверхгиганта системы Cyg X-1 наблюдаются сильные избытки (от 0.4 до 1.0 dex) содержаний He, N, Ne, Mg, Si, то есть элементов, подвергшихся влиянию CNO- и α -процессов. По-видимому, перемешивание вещества в этом объекте происходило значительно эффективнее, чем в одиночной звезде α Cam. Это, вероятно, вызвано приливным взаимодействием и обменом масс с релятивистским компонентом на предшествующей и современной стадиях эволюции, в том числе возможно на стадии общей оболочки, если система проходила эту стадию. Содержания элементов, не синтезируемых в CNO- и α -процессах (Al, S и Zn), в HDE 226868 больше, чем в α Cam, на 0.15-0.30 dex. Это указывает на различие составов межзвездного вещества, из которого образовались исследуемые звезды.

2. Обсуждение и выводы

Cyg X-1 находится практически в плоскости Галактики (его z -координата не превосходит ~ 0.1 кпк). Звезда α Cam является убегающей и удалена от плоскости Галактики на ~ 500 пк. Она расположена в направлении галактической долготы

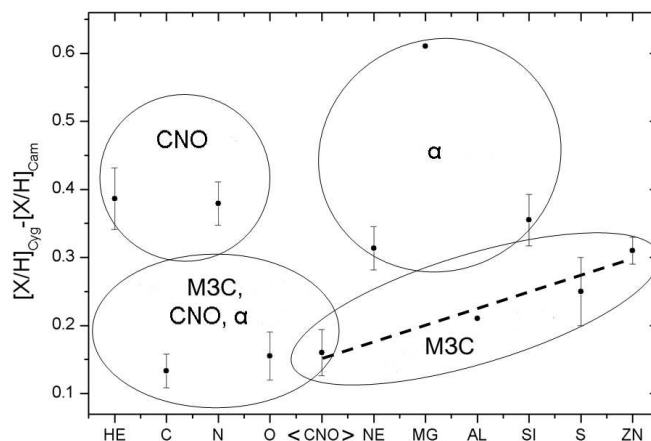


Рис. 1. Отношения содержаний элементов в HDE 226868 (Cyg X-1) и α Сам. По оси X указаны химические элементы; «CNO» обозначает усредненное содержание трех элементов. По оси Y отложены разности десятичных логарифмов относительных содержаний элементов к водороду в фотосфере HDE 226868 по сравнению с фотосферой α Сам (то есть логарифмы отношений содержаний элементов в этих двух звездах). Вертикальные бары – неопределенности значений этих разностей на уровне значимости 68% ($\pm 1\sigma$). Овалами выделены группы элементов, относительные содержания которых подвержены влиянию CNO-цикла горения водорода, α -процессам горения гелия, обоим процессам (M3C, CNO, α) и ни одному из них (M3C). Отношения содержаний (или разности их в шкале десятичных логарифмов) элементов последней группы, по-видимому, указывают на различие химического состава межзвездной среды в местах образования каждой из звезд

$l = 144^\circ$ на расстоянии $d = 2.1$ кпк от Солнца, а Cyg X-1 – на долготе $l = 74^\circ$ и удалении $d = 2.5$ кпк. Таким образом, проекция на плоскость Галактики расстояния между объектами составляет $d = 2.5 \div 2.7$ кпк при различии галактоцентрических расстояний ~ 2 кпк.

Найденные нами различия химического состава атмосфер Cyg X-1 и α Сам указывают на разный характер перемешивания вещества в этих звездах. То, что обе звезды находятся на эволюционной стадии сверхгиганта, означает, что в ядрах обеих звезд CNO-цикл объемного горения водорода завершился. На величинах относительных содержаний $[\text{He}/\text{H}]$ и $[\text{N}/\text{H}]$ в атмосфере одиночной звезды α Сам это либо не сказалось совсем, либо повлияло намного меньше, чем на состав атмосферы сверхгиганта HDE 226868, входящего в тесную двойную систему, то есть, скорее всего, близко расположенный к оптическому второй компонент с массой 10 солнечных масс (в Cyg X-1 это кандидат в черную дыру) своим приливным воздействием вызывает (или намного усиливает) перемешивание и вынос продуктов ядерного горения из ядра во внешние слои звезды.

CNO-цикл приводит к росту отношения $[\text{He}/\text{H}]$ содержания гелия относительно водорода, но оставляет неизменным суммарное содержание C, N и O, лишь перераспределяя их содержания в пользу азота. Поскольку космическая распространенность азота в несколько раз ниже, чем углерода и тем более кислорода, такое перераспределение сильно влияет на относительное содержание азота, но слабо сказывается на содержании C и O (см. рис. 1).

Обнаруженные нами избытки Ne, Mg и Si в атмосфере сверхгиганта системы Cyg X-1 указывают на то, что в атмосфере звезды присутствует вещество, подвергшееся воздействию α -процессов горения гелия. Оно могло бы быть вынесено

из глубоких недр звезды чрезвычайно интенсивным перемешиванием, частично захватывающим компактное плотное ядро сверхгиганта, но не ясен механизм, способный выносить к поверхности звезды вещество из глубокой потенциальной ямы, образованной ядром.

Другая возможность – это загрязнение атмосферы сверхгиганта продуктами взрыва второго компонента как сверхновой, приведшего к образованию наблюдаемого ныне релятивистского компонента – черной дыры. Однако загрязненный таким способом внешний слой сверхгиганта постепенно уносится звездным ветром и вскоре исчезает. Поэтому такое предположение о природе наблюдаемого загрязнения должно означать, что время, прошедшее после взрыва сверхновой, много меньше возраста двойной системы.

Независимо от источника загрязнения атмосферы HDE 226868 продуктами α -процессов мы должны исключить из рассмотрения все те химические элементы, содержание которых подверглось значительным изменениям, и использовать только те элементы, содержание которых не могло сильно измениться за время эволюции звезды. Кратко обсудим с этой точки зрения влияние α -процессов.

В результате α -процессов ядра ${}^4\text{He}$ сливаются, образуя углерод ${}^{12}\text{C}$. Далее возможно последовательное присоединение к ним α -частиц с образованием ${}^{16}\text{O}$ и четно-четных изотопов некоторого количества последующих четных элементов. В зависимости от температуры и плотности вещества в области горения гелия, определяемых (по крайней мере для одиночных звезд) прежде всего массой звезды, α -процесс либо обрывается на стадии образования C или O, либо продолжается до образования Ne, Mg, Si (а в некоторых случаях и серы и более тяжелых элементов). В системе Cyg X-1 α -процессы, по-видимому, завершились образованием Si и не затронули серу.

Как и в случае CNO-цикла, α -процесс сильно увеличивает относительное содержание химических элементов, имеющих относительно малую распространенность (Ne, Mg, Si), но не может сильно изменить среднее по звезде содержание значительно более обильных элементов (He, C и O).

Из вышесказанного видно, что для грубых оценок, которыми мы и ограничиваемся здесь, можно принять среднее содержание элементов группы CNO, а также содержания элементов, не подверженных непосредственному влиянию ни α -процессов, ни CNO-цикла (в нашем случае это Al, S и Zn), в качестве индикаторов различия химического состава межзвездного вещества, из которого образовались исследованные нами звезды.

Если принять во внимание ограниченное время эволюции массивных O-звезд, не превышающее $\sim 10^7$ лет, то можно считать, что их химический состав определяет содержание элементов в межзвездной среде практически в настоящее время в местах их образования. При пекулярных скоростях, не превышающих ~ 10 км/с [6], за время своей эволюции O-звезды удаляются от места рождения не более чем на 100 пк. Это относится к Cyg X-1. Для убегающей звезды α Сам скорость на порядок величины больше. Движение направлено преимущественно перпендикулярно плоскости Галактики. Поэтому проекция пути перемещения на галактическую плоскость меньше, чем характерные размеры сверхоблаков (~ 1 кпк) и неоднородностей химического состава межзвездной среды (~ 2 – 3 кпк). Продолжительность жизни O-звезд по крайней мере на 2 порядка меньше того времени (1–2 млрд. лет), за которое может накопиться наблюдаемое различие содержаний тяжелых элементов в разных местах плоскости Галактики.

Итак, часть найденного нами различия состава атмосфер α Сам и оптического компонента Cyg X-1, вызвана различием химического состава межзвездного вещества, из которого эти звезды образовались. Для того чтобы выбрать набор

элементов – индикаторов состава межзвездной среды, мы разделили 10 химических элементов, отношения содержаний которых в фотосферах двух О-сверхгигантов были нами определены, на 4 группы. На рис. 1 овалами выделены группы элементов, относительные содержания которых подвержены влиянию CNO-цикла горения водорода, α -процессам горения гелия, обоим процессам и ни одному из них. Разные относительные содержания последних (Al, S, Zn), по-видимому, указывают на различие химического состава вещества межзвездной среды в местах образования звезд. К ним можно также отнести среднее содержание группы CNO. Найденное нами пространственное различие содержания тяжелых элементов в межзвездной среде галактического диска согласуется с данными [3], полученными по 50 цефеидам. Это является взаимным подтверждением результатов двух исследований.

Заметим, что в области галактоцентрических расстояний $6.6 < R_G < 10.6$ кпк практически отсутствует радиальный градиент содержания тяжелых элементов в галактическом диске [3]. Согласно [7] отсутствие радиального градиента тяжелых элементов в окрестности Солнца, вероятно, связано с его близостью к области коротационного резонанса в Галактике. В эту зону попадают оба изученных О-сверхгиганта. Поэтому найденное нами различие содержаний тяжелых элементов в двух участках межзвездной среды не может быть вызвано градиентами содержания элементов вдоль галактического радиуса, а определяется клочковатостью распределения тяжелых элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-02-00993, 09-02-01136, 10-02-01145 и 09-02-97017).

Summary

E.A. Karitskaya, N.G. Bochkarev, V.V. Shimansky, G.A. Galazutdinov. Element Abundance Inhomogeneity in the Interstellar Medium Based on the Data of HDE 226868 (Cyg X-1) and α Cam.

Synthetic spectrum modelling with allowance for non-LTE effects was used to determine element abundances in the atmospheres of two O-supergiants with similar physical characteristics: HDE 226868 (Cyg X-1 optical component) and α Cam localized at a distance of 2.5–2.7 kpc from each other. The average CNO, as well as Al, S, and Zn abundance differences are 0.15–0.30 dex. HDE 226868 has higher abundances compared to α Cam. The differences are in good qualitative agreement with heavy element distribution over the Galaxy disk derived by Luck et al. on the basis of 50 galactic Cepheids. This fact confirms the inhomogeneity of heavy element distribution on the scale of 2 kpc and is in agreement with the concept of preservation of the intrinsic particularities of interstellar medium “superclouds” on a time-scale of more than 1 Gyr.

Key words: element abundances, interstellar matter inhomogeneity, superclouds, O-supergiant, spectrum modelling, non-LTE models, stellar atmospheres.

Литература

1. *Ефремов Ю.Н.* Очаги звездообразования в галактиках. – М.: Наука, 1989. – 248 с.
2. *Бочкарев Н.Г.* Основы физики межзвездной среды. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 352 с.
3. *Luck R.E., Kovtyukh V.V., Andrievsky S.M.* The Distribution of the Elements in the Galactic Disk // *Astron. J.* – 2006. – V. 132, No 2. – P. 902–918.
4. *Шиманский В.В., Борисов Н.В., Шиманская Н.Н.* Эффекты отражения и параметры старых предкатаклизмических переменных MS Peg и LM Cam // *Астрон. журн.* – 2003. – Т. 80, № 9. – С. 712–844.

5. *Карицкая Е.А., Бочкарев Н.Г., Бондарь А.В., Галазутдинов Г.А., Ли Б.-К., Мусаев Ф.А., Сапар А.А., Шиманский В.В.* Спектральный мониторинг V1357 Cyg = Cyg X-1 в 2002–2004 гг. // Астрон. журн. – 2008. – Т. 85, № 5. – С. 409–426.
6. *Артюхина Н.М.* Движения групп звезд ранних спектральных классов и орионовых переменных по отношению к галактической плоскости // Астрон. журн. – 1970. – Т. 47, № 3. – С. 667–668.
7. *Acharova I.A., Lepine J.R.D., Mishurov Yu.N., Shustov B.M., Tutukov A.V., Wiebe D.S.* A mechanism for the formation of oxygen and iron bimodal radial distribution in the disc of our Galaxy // Mon. Not. R. Astr. Soc. – 2010. – V. 402, No 2. – P. 1149–1155.

Поступила в редакцию
14.12.10

Карицкая Евгения Алексеевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института астрономии РАН, г. Москва.

E-mail: *karitsk@yandex.ru*

Бочкарев Николай Геннадиевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга, г. Москва.

E-mail: *boch@sai.msu.ru*

Шиманский Владислав Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: *Slava.Shimansky@ksu.ru*

Галазутдинов Газинур Анварович – кандидат физико-математических наук, доцент Института астрономии Католического университета Дель-Норте, г. Антофагаста, Чили.

E-mail: *runizag@gmail.com*